بررسی تأثیر دما و زمان فرایند رخنه‌دهی بر مقاومت به سایش و خواص ماده‌ی مرکب WC/Cu*

حمید خرسند[۱]		مصطفی امیرجان[۲]		حسن عبدوس[۳]

چکیده

در این تحقیق، نمونه‌های ماده‌ی مرکب زمینه مسی با ۵۳ درصد حجمی ذرات تقویت کننده‌ی WC به‌روش رخنه‌دهی تهیه شدند. چگالی و رسانایی الکتریکی نمونه‌های ماده‌ی مرکب تولید شده اندازه‌گیری شدند. افزون بر این، رفتار سایشی ماده‌ی مرکب WC/Cu به‌روش سوزن بر روی صفحه با استفاده از صفحه‌ی ساینده از جنس SiC مطالعه و بررسی شد. بررسی‌ها نشان دادند که با افزایش دما و زمان رخنه‌دهی، چگالی نهایی به چگالی نظری نزدیک‌تر شده و در یک دمای خاص، چگالی با افزایش زمان افزایش می‌یابد. در نیروی عمودی اعمالی حدود ۹ نیوتن، نرخ سایش ماده‌ی مرکب WC/Cu به‌طور خطی با افزایش فشار اعمالی افزایش یافت. حضور تخلخل به‌دلیل کاهش سطح تماس مؤثر و ایجاد اثر شیار بر روی سطح ماده‌ی مرکب، باعث افزایش سایش شد.

واژه‌های کلیدی ماده‌ی مرکب WC/Cu، رخنه‌دهی، سایش.

The Effect of Temperature and Time of Infiltration Process on the Wear Resistance and Properties of WC/Cu Composite

H. Khorsand		M. Amirjan		H. Abdous

Abstract

In the present study, copper matrix composite samples with 53 volume percent WC reinforcement particles were produced using the infiltration technique. The density and electrical conductivity of the composite samples produced by this technique were measured. Moreover, the wear behavior of WC/Cu composite was investigated using the pin-on-disk method with an abrasive disk made up of SiC. It was found that the final density approaches the theoretical density with an increase in the temperature and time of the infiltration process, and for a given temperature, the density increases as the time increases. For an applied normal load of 9 N, the wear rate of WC/Cu composite increases linearly with the applied load. The presence of porosity increased the wear rate of the composite due to a decrease in the effective contact surface and induced notch effect on the composite surface.

Key Words WC/Cu Composite, Infiltration, Wear.

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ۸۸/۹/۲۵ و نسخه پایانی آن در تاریخ ۸۹/٦/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار،دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(۲) دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(۳) عهده‌دار مکاتبات: دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مقدمه

مواد مرکب زمینه فلزی موادی هستند که در آن‌ها معمولاً یک فاز سرامیکی برای بهبود خواص درون زمینه‌ی فلزی قرار داده می‌شود. اگرچه بهتر است که این فازها از هم جدا باشند، امّا واکنش‌هایی بین آنها اتفاق می‌افتند. لایه‌ها، الیاف پیوسته، الیاف ناپیوسته، ویسکرها و ذرات با مورفولوژی متفاوت، از جمله تقویت‌کننده‌هایی هستند که معمولاً در مواد مرکب زمینه فلزی به‌کار می‌روند. هر یک از این تقویت‌کننده‌ها فلز پایه را به‌شیوه‌ای خاص تحت تأثیر قرار می‌دهند، امّا معمولاً یکی از خواص فلز پایه بهبود می‌یابد. از جمله‌ی این خواص می‌توان به استحکام تسلیم، سختی، استحکام کششی، مقاومت به سایش و ضریب انبساط حرارتی اشاره کرد. رسانایی الکتریکی و حرارتی خواصی هستند که به کل ماده وابسته‌اند [3-1].

متالورژی پودر فرایند تجاری مناسبی برای تولید مواد مرکب ذره‌ای با زمینه‌ی مس است. این فرایند شامل مخلوط کردن پودر، فشردن و تف‌جوشی آن می‌باشد. مواد مرکب زمینه مس با تقویت کننده‌ی کاربید تنگستن، دسته‌ای از مواد مرکب با زمینه‌ی مسی هستند که رسانایی حرارتی و الکتریکی مس و نیز، مقاومت به سایش مکانیکی و سایش جرقه‌ای کاربید تنگستن را برای دستیابی به خواص مطلوب دارند. بنابراین، این مواد مرکب دارای کاربردهایی از جمله اتصالات الکتریکی، رله‌ها و سوییچ‌ها، الکترودهای EDM و نظیر آن خواهند بود. این مواد با اغلب سرامیک‌ها از دیدگاه ضریب انبساط حرارتی سازگاری داشته و بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان فروکشنده‌ی حرارت استفاده کرد [4].

مواد مرکب زمینه مسی با ذرات سرامیکی از مقاومت به سایش و جرقه‌ی بسیار خوب و رسانایی الکتریکی بالایی برخوردارند، بنابراین از آن‌ها می‌توان در کاربردهایی از قبیل الکترودهای جوش‌کاری، مواد اصطکاکی پایه فلزی برای موتورهای سرعت بالا و نیز، قطعه‌های خنک‌کننده در سازه‌های توربین گازی و اجزای فعال پلاسمایی در دستگاه‌های قدرت گداخت، استفاده کرد [5,4].

فرایند متداول در ساخت مواد مرکب زمینه مسی از چند مرحله‌ی مخلوط کردن اجزای سازنده، فشردن سرد و تف‌جوشی تشکیل شده است. روش متداول دیگر، استفاده از رخنه‌دهی فاز مایع است که در آن فلز مس به درون یک اسکلت متخلخل نفوذ داده می‌شود [6,5].

سختی فلز، به همراه سختی سطح ساینده، مقاومت آن را در برابر سایش کنترل می‌کنند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که کاهش نرخ سایش نسبی به‌ازای افزایش سختی فلز تحت سایش تا ۰/۸ سختی سطح ساینده می‌باشد [7]. پدیده‌ی سایش برای مواد مرکب زمینه فلزی در مقایسه با فلزات خالص، به‌دلیل وجود چند فاز در ریزساختار آن‌ها، متفاوت است. اعتقاد بر این است که در مراحل ابتدایی سایش، ذرات ساینده موجب کندگی در زمینه‌ی فلزی نرم شده و ذرات تقویت کننده را در سطح به‌صورت برجسته بر جای می‌گذارند.

افزون بر این، مقاومت به سایش مواد مرکب با بهینه‌سازی خواص ذاتی آن‌ها در مراحل طراحی و ساخت نیز می‌تواند کنترل شود. از جمله عوامل مؤثر می‌توان به پارامترهای ساخت اشاره کرد که می‌توانند با تأثیرگذاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی مواد مرکب، رفتار سایشی آن‌ها را نیز تحت تأثیر قرار دهند. برخی از این عوامل عبارتند از: اندازه و شکل ذرات، کسر حجمی فازهای زمینه و تقویت کننده، فشار شکل‌دهی، دما و زمان عملیات رخنه‌دهی.

تأثیر تخلخل بر رفتار سایشی مواد مرکب کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در مطالعات محدود انجام شده در این زمینه مشاهده شده است که تخلخل

می‌تواند تأثیرات زیان‌آوری بر مقاومت به سایش مواد مرکب داشته باشد. بررسی محققان نشان داده است که وقتی نیروهای خارجی به مواد مرکب اعمال می‌شوند، حفره‌ها مانند منابع تشکیل ترک عمل کرده و در نتیجه، نرخ سایش افزایش می‌یابد [8].

در این تحقیق، نمونه‌هایی از ماده‌ی مرکب WC/Cu به‌روش رخنه‌دهی تهیه شده و تأثیر دما و زمان رخنه‌دهی بر خواص نهایی آنها از جمله چگالی، مقاومت الکتریکی و مقاومت به سایش، مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش آزمایش

پودر کاربید تنگستن (با درجه خلوص ۹۹/۵٪ تهیه شده از شرکت Xiamen) با اندازه میانگین ذرات برابر با ۱ میکرومتر، به‌منظور ساخت نمونه‌های متخلخل مناسب برای فرایند رخنه‌دهی استفاده شد. پودر مورد نظر پس از اندازه‌گیری وزن، در قالب فولادی استوانه‌ای با فشار ۳٤/٥ MPa فشرده شد. قطر و ارتفاع نمونه‌های حاصل به‌ترتیب برابر با ۹/٦ mm و ۳/۸ mm بود، و چگالی آنها ۵۳ درصد چگالی نظری ماده‌ی اصلی بود. برای انجام عملیات رخنه‌دهی، از یک قطعه‌ی مسی با درجه خلوص ۹۹/۹٪ استفاده شد. قطعه‌ی مسی پس از توزین، در بالای نمونه‌های کاربید تنگستن فشرده شده قرار گرفت، و سپس مجموعه درون کوره قرار داده شد. فرایندهای تف‌جوشی و رخنه‌دهی در کوره‌ای با محیط هیدروژن و در دماهای بین ۱۲۰۰ °C تا ۱۳۵۰ °C به‌مدت زمان‌های مختلف انجام شدند.

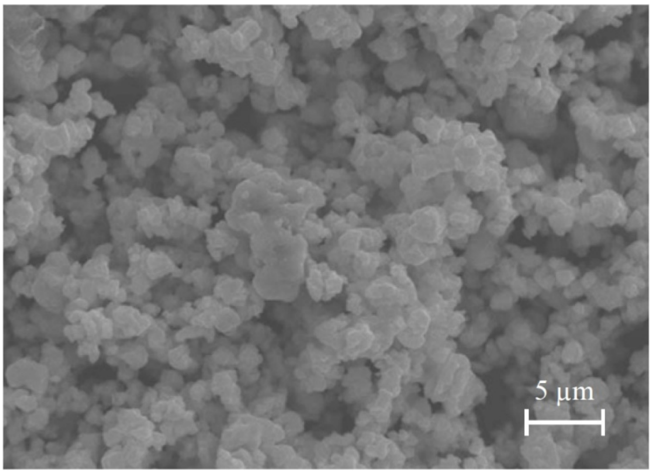
چگالی نمونه‌های به‌دست آمده بر اساس استاندارد ASTM-B311 و به‌کمک دستگاه چگالی‌سنج Sartorius اندازه‌گیری شد. برای بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها، از تصویرهای به‌دست آمده از میکروسکپ نوری استفاده شد. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها به‌کمک دستگاه مقاومت‌سنج مجهز به چهار اندازه‌گیر، تعیین شد.

از روش سوزن بر روی صفحه برای بررسی خواص سایشی نمونه‌ها استفاده شد. ابتدا سطح نمونه‌ها سنباده زده شد، و نمونه‌های مکعبی با سطح تماس ۰/۱٦۷ سانتی‌متر مربع در معرض صفحه‌ی چرخان با سرعت ۱۸٤ rpm قرار گرفت. صفحه‌ی مورد استفاده، تیغه برش ساینده از جنس SiC بود. نیروی اعمالی از ۱/۱۲ نیوتن تا ٤/۲۷ نیوتن متغیر بود. برای هر نمونه، مسافت سایش ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. آزمون سایش پس از طی مسافت فوق در هر مرحله متوقف شد و کاهش وزن نمونه پس از تمیزکاری آن به‌دقت انجام گرفت. حداقل سه آزمون برای هر حالت انجام گرفت و مقدار میانگین به‌دست آمده برای آن گزارش شد. با تقسیم حجم ماده‌ی ساییده شده بر فاصله‌ی لغزش، نرخ سایش برای هر یک از نمونه‌های ماده‌ی مرکب به‌دست آمد. حجم ماده‌ی ساییده شده نیز با تقسیم میزان کاهش وزن نمونه بر چگالی آن، محاسبه شد.

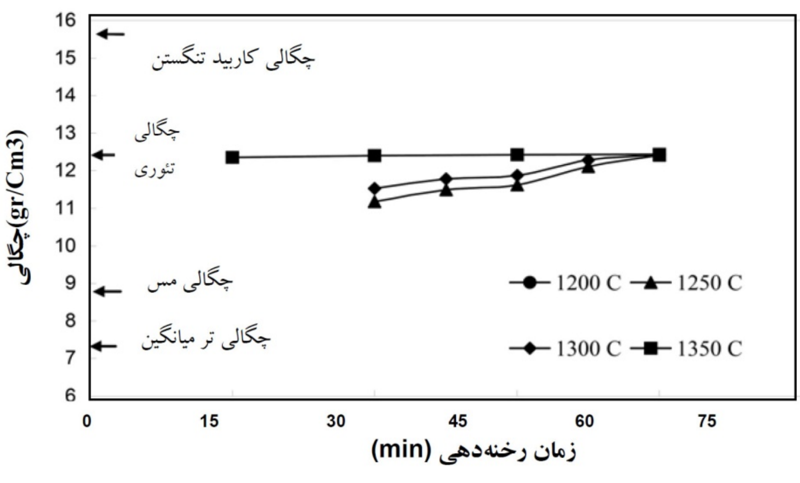
نتایج و بحث

چگالی. مورفولوژی پودرهای مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. تغییرات چگالی نمونه‌های تهیه شده در دماها و زمان‌های مختلف در شکل (۲) آمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، چگالی ماده‌ی مرکب با افزایش دما و زمان فرایند افزایش یافته و به چگالی نظری آن نزدیک می‌شود. سهولت انجام فرایند رخنه‌دهی در دماهای بالاتر، دلیل احتمالی این پدیده است. از آنجا که نمونه‌ی WC متخلخل است، رسانایی حرارتی کم‌تر و ظرفیت حرارتی بالاتری نسبت به مس دارد. بنابراین، به دما و زمان بالاتری برای پیش‌گیری از انجماد مس قبل از تکمیل شدن عملیات نیاز است. در دماهای پایین‌تر،

زمان نگه‌داری بـالاتر خواهـد بـود. در دماهـای بـالاتر رخنه‌دهی، هر دو عامل ویسکوزیته و فـوق گـداز فلـز مس برای وقوع فرایند رخنه‌دهی مناسب بـوده، و ایـن منجر به حصول چگالی نهایی نزدیک به چگالی نظـری می‌شود. افزایش چگالی در یک دمای معین بـا افـزایش زمان، به‌این دلیل است که هـوا وگازهـای محبـوس در نمونه‌ی متخلخل برای نفوذ و خروج از آن مدت زمـان بیش‌تری در اختیار داشته و به‌این ترتیب، مـذاب مـس اجازه می‌یابد تا به درون حفره‌های ریـز نفـوذ کـرده و فرایند رخنه‌دهی را کامل کند. افـزون بـر ایـن، کـاهش ویسکوزیته با افزایش دمـا در پدیـده‌ی نفـوذ گازهـای محبوس تأثیر مفیدی دارد. بنابراین، با افزایش دما زمان عملیات می‌تواند کاهش یابد.



شکل۱ مورفولوژی ذرات پودر WC مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲ تغییرات چگالی نمونه‌ها با دما و زمان عملیات

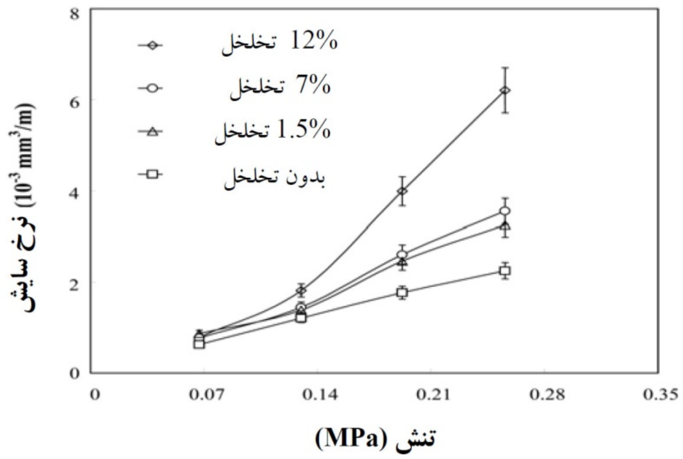
مقاومت الکتریکی. در جـدول (۱)، نتـایج مربـوط بـه آزمون تعیین مقاومت الکتریکی نشان داده شـده اسـت. مقاومت الکتریکی یک نمونه از ماده‌ی مرکـب پـس از رخنه‌دهی کامـل، حـدود 3.3×10^{-6} Ω-cm و رسـانایی حرارتی آن 52% IACS بـود. در جـدول (۱)، مقـادیر عددی مقاومت الکتریکـی نمونـه‌هـای مـاده‌ی مرکـب WC/Cu بـرای مقایسـه آورده شـده اسـت. بررسـی مقادیر فوق نشان می‌دهد که اگرچه مقاومت الکتریکـی می‌باید با افزایش دما و زمان عملیات بـه‌دلیـل کـاهش میزان تخلخل و افزایش چگـالی نهـایی، کـاهش یابـد، ولی در نمونه‌های کاملاً رخنه‌دهی شده و با چگالی‌های مختلف نیز تخلخل تأثیر چندانی بر مقاومت الکتریکـی نداشته و مقـادیر تقریبـاً یکـسانی بـه‌دسـت آمـده‌انـد. اتصال‌پذیری (connectivity) مس برای تأمین مسیر آسان برای رسانایی الکتریکی، عامل مهم در این زمینـه می‌باشد که بر رسانایی و مقاومت الکتریکی تأثیر دارد.

سایش. آزمون سایش برای نمونه‌هـای مـاده‌ی مرکـب WC/Cu با میزان‌های مختلـف تخلخـل، برابـر بـا ۰، ۱/۵، ۷ و ۱۲ درصد، انجام شد. شکل (۳)، نرخ سـایش را در این آزمون و در شرایط مختلف نـشان مـی‌دهـد. نرخ سایش همه‌ی نمونه‌ها با افـزایش نیـروی اعمـالی افزایش یافته است. نمونه‌ی WC/Cu با چگالی کامـل دارای کم‌ترین نـرخ سـایش و نمونـه‌ی تهیـه شـده در دمـای ۱۲۰۰ °C بـا بـیش‌تـرین میـزان تخلخـل (۱۲ درصد)، بالاترین نرخ سایش را دارد. نمونه‌های بـا ۱/۵ و ۷ درصـد تخلخـل کـه در دمـای ۱۲۵۰ °C تهیـه شده‌اند، از نرخ سایش متوسطی برخوردراند.

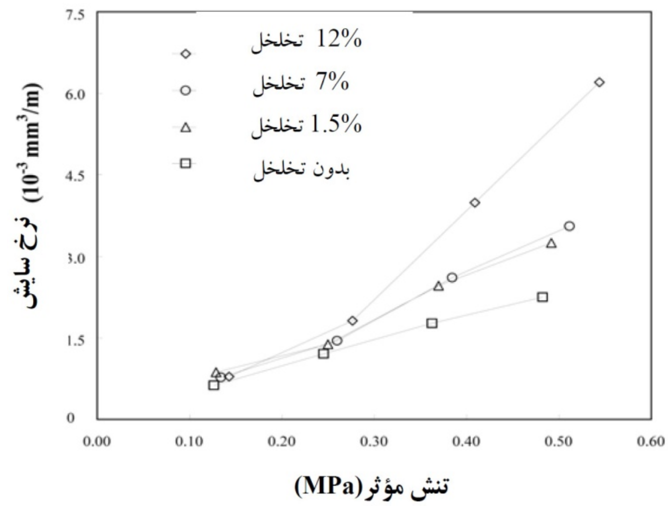
نتایج آزمـون در شـکل (٤) نـشان مـی‌دهنـد کـه تخلخل در نیروهـای بـالاتر تـأثیر بـیش‌تـری دارد. در صورت وجود تخلخل در سطح سایش، سـطح تمـاس در معرض سطح ساینده به‌میـزان چـشم‌گیـری کـاهش یافته و به‌این ترتیب، تـنش خـالص حـاکم بـر سـایش افزایش می‌یابد. شکل (۵) نـرخ سـایش را بـه‌صـورت تابعی از تنش تماسی مؤثر در طول فرایند سایش نشان می‌دهد. با مقایـسه‌ی شـکل‌هـای (٤) و (۵)، مـی‌تـوان دریافت که با به‌کارگیری تنش سایشی مؤثر نرخ سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب حاوی تخلخل به سمت ماده‌ی مرکب کاملاً چگال تغییر می‌کند، امّا به‌طور کامل بـر آن منطبق نمی‌شود. افزون بر این، تخلخل بـیش‌تـر نمونـه منجر به انحراف بیش‌تر نرخ سایش آن از نـرخ سـایش مربوط به ماده‌ی مرکب چگال می‌شود.

جدول ۱ مقاومت الکتریکی نمونه‌های ماده‌ی مرکب WC/Cu

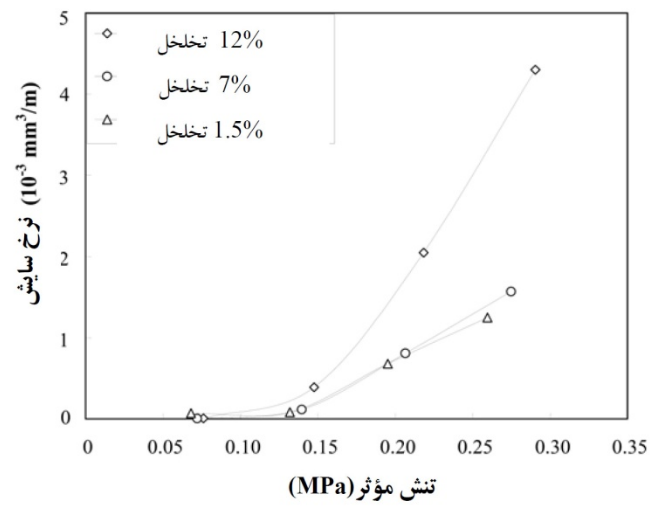
زمان (دقیقه)	دما (درجه سانتی‌گراد)			
	۱۳۵۰	۱۳۰۰	۱۲۵۰	۱۲۰۰
۱۵	۳/۴	–	–	–
۳۰	۳/۳	۳/۳	۳/۴	–
۴۵	۳/۴	۳/۴	۳/۳	–
۶۰	۳/۳	۳/۵	۳/۴	۳/۳



شکل ۳ تأثیر میزان تخلخل بر نرخ سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب WC/Cu



شکل ٤ تأثیر میزان تخلخل بر نرخ سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب WC/Cu با در نظر گرفتن سطح مؤثر



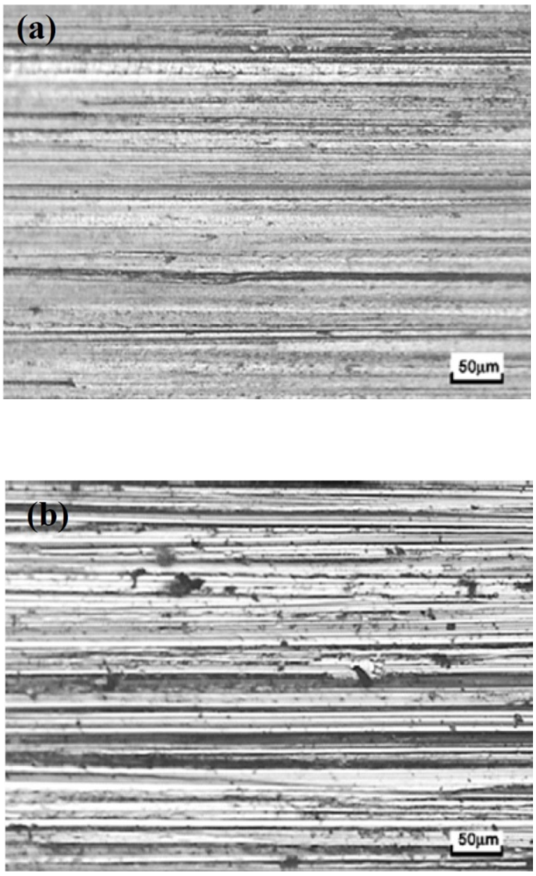
شکل ۵ تأثیر شیار مربوط به تخلخل بر نرخ سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب WC/Cu

نرخ سایش بالاتر به دست آمده به‌دلیل حضور تخلخل، تأثیر سایر مشخصه‌های تخلخل از جمله شکاف را نشان می‌دهد. وجود مرزهای بی‌شکل در اطراف حفره، امکان ایجاد گوشه‌های تیز در نزدیکی سطح سایش در حول آن را فراهم می‌کند. شدت تمرکز تنش در گوشه‌های تیز بسیار زیاد بوده و بنابراین، با اعمال تنش فشاری عمودی در آزمون سایش و ایجاد نیروی برشی عرضی در اطراف حفره‌ها، تخلخل به‌عنوان منبع ترک عمل خواهد کرد [7-9].

Gui و همکاران [10]، این رفتار سایشی را با سایش لغزشی در ماده‌ی مرکب Al-6Cu-Mn/SiC$_p$ مطالعه کرده‌اند. شدت تمرکز تنش در گوشه‌ی حفره‌ها با افزایش نیروی عمودی اعمالی افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش نیروی عمودی اعمالی، سطح اطراف حفره نسبت به شکست مستعد می‌شود. به‌دلیل آن‌که ماده‌ی مرکب چگال رفتار معمول سایشی را از خود نشان می‌دهد، تأثیر شیار مربوط به تخلخل را می‌توان با نمایش انحراف نرخ سایش در تنش‌های مختلف نشان داد. شکل ٦ تصویرهای میکروسکپ نوری از سطح ماده‌ی مرکب و مس خالص را پس از سایش نشان می‌دهد. نرخ سایش مس به‌ازای همه‌ی نیروهای اعمالی، بسیار بالاتر از نمونه‌های WC/Cu می‌باشد. در نیروی اعمالی ٤ نیوتن، نرخ سایش مس به‌مراتب بیشتر از نرخ سایش ماده‌ی مرکب WC/Cu است. در شکل (٦)، سطح پولیش داده شده‌ی صاف با ظاهر خراشیده‌ی نمونه‌ی WC/Cu دیده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی سازوکار وقوع سایش با تنش کم می‌باشد. بر اساس این سازوکار، زمینه‌ی نرم مس در مراحل ابتدایی توسط ذرات ساینده‌ی SiC از سطح ماده‌ی مرکب کنده شده و به این ترتیب، ذارت تقویت کننده‌ی WC به‌صورت برجسته در سطح قرار می‌گیرند. در ادامه، این ذرات سخت در سطح ماده در تماس با ذرات SiC ساینده قرار گرفته و به‌دلیل سختی بسیار نزدیک WC به SiC، به ذرات SiC از طرف ذرات WC کرنش اعمال شده و در نهایت، کیفیت عمل‌کرد ذرات ساینده‌ی SiC کاهش می‌یابد. این سازوکار باعث کاهش شدید میزان سایش توسط ذرات SiC شده و در نتیجه، نرخ سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب WC/Cu در مقایسه با مس خالص به‌شدت کاهش می‌یابد.

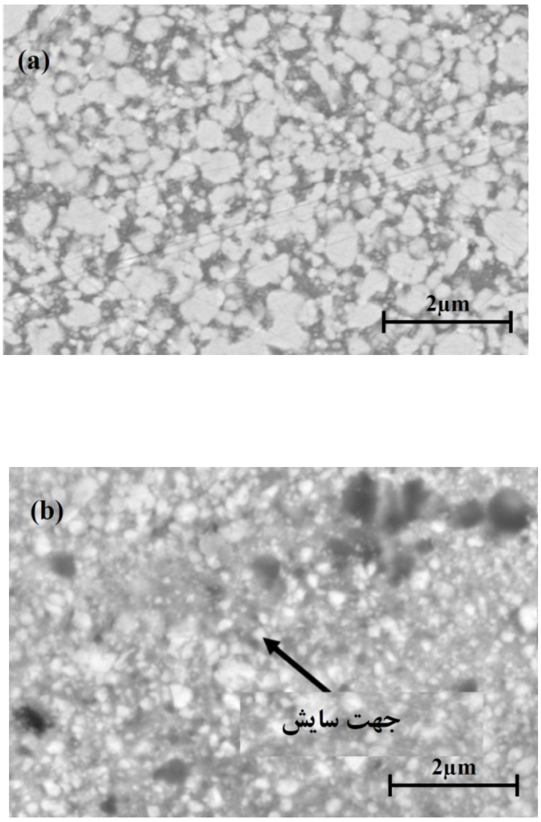
مکانیزم سایش. در مواد مرکب تقویت شده با ذرات سخت، مقاومت به سایش ابتدا از مقاومت به برش ذرات تقویت کننده در برابر تنش برشی حاصل از سطح ساینده‌ی درگیر با آن نتیجه می‌شود. در صورتی‌که ماده‌ی مرکب کاملاً چگال بوده و استحکام سطحی بین تقویت‌کننده و زمینه به‌حدی باشد که از بیرون آمدگی (Pull-out) ذرات از زمینه جلوگیری کند، سایش تقویت کننده نرخ سایش کل ماده را کنترل می‌کند. با افزایش نیروی عمودی بین دو سطح درگیر، اصطکاک که نیروی برشی اعمالی بر سطح تقویت کننده را تولید می‌کند، افزایش می‌یابد. اگر میزان این تنش برشی به حدی برسد که بر استحکام سطحی بین زمینه و تقویت‌کننده غلبه کند، بیرون آمدگی تقویت کننده از درون زمینه رخ می‌دهد. ایجاد چنین شرایطی در سایش، نرخ بالاتر سایش را به‌دنبال دارد. سازوکار سوم برای سایش ماده‌ی مرکب، بر مبنای حضور تخلخل در آن است. حفره‌ها باعث افزایش نیروی عمودی مؤثر سایش اعمالی بر آن‌ها می‌شوند. با فرض توزیع یکنواخت حفره‌ها در ماده‌ی مرکب، تنش عمودی مؤثر بر سطح سایش افزایش می‌یابد، زیرا نواحی حاوی حفره درون زمینه هیچ نیرویی را تحمل نمی‌کنند.

در تصویرهای SEM از سطح سایش، بیرون آمدگی تقویت کننده از سطح ماده‌ی مرکب در فرایند سایش قابل مشاهده است. در شکل (۷)، سطح سایش قبل و بعد از آزمون سایش نشان داده شده است. جهت سایش در شکل (۷-b) مشخص شده است. نواحی تیره در شکل (۷-b) حفره‌هایی هستند که پس از بیرون آمدگی ذرات از سطح ایجاد شده‌اند.



شکل ٦ تصویر میکروسکپ نوری از سطح ماده‌ی مرکب WC/Cu کاملاً چگال (a)، و مس خالص (b)؛ شرایط آزمون سایش: نیروی اعمالی ٤/٢٧ نیوتن و مسافت لغزش ٥٠٠ متر

اندازه‌ی ذرات تقویت کننده از جمله عواملی می‌باشد که بر نرخ سایش مؤثر است. با افزایش اندازه‌ی ذرات، نرخ سایش افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار، تمایل بیش‌تر ذرات درشت‌تر به ایجاد ریزترک‌ها می‌باشد، که نتیجه‌ی مستقیم آن افزایش نرخ سایش است [10-12].



شکل ۷ تصویر میکروسکپ الکترونی از ماده‌ی مرکب WC/Cu؛ (a): قبل از سایش، (b): بعد از سایش. بیرون آمدگی ذراتب به‌خوبی در تصویرها قابل تشخیص است. پیکان نشان داده شده در شکل b، جهت سایش را مشخص می‌کند.

نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دما و زمان رخنه‌دهی، چگالی نهایی ماده‌ی مرکب به چگالی تئوری آن نزدیک‌تر شده و در یک دمای خاص، چگالی با افزایش زمان افزایش یافت.

۲- در نیروی عمودی اعمالی حدود ۹ نیوتن، نرخ

سایش مادهی مرکب WC/Cu بهطور خطی با افزایش فشار اعمالی افزایش یافت.

۳- حضور تخلخل بهدلیل کاهش سطح تماس مؤثر و ایجاد اثر شیار بر روی سطح مادهی مرکب، باعث افزایش سایش شد.

٤- افزون بر سایش ساینده، بیرون آمدگی ذرات از زمینه سازوکار غالب در فرایند سایش بود.

مراجع

1. Mortensen A., "*Solidification of Metal Matrix Composites*", P. Rohatgi (ed), TMS, pp. 1, (1990).
2. Mortensen A., Cornie J.A., "On the Infiltration of Metal Matrix Composites", *Met. Trans.,* 18(A), pp. 1160-1163, (1987).
3. Gusmano G., Bianco A., Polini R., "Chemical Synthesis and Sintering Behavior of Highly DispersedW/Cu Composite Powders", *J. of Mat. Sci.* 36, pp. 901-907, (2001).
4. Wang W.F., "Effect of Particle Size and Copper Content on W-Cu Electrodes", *Powder Met.*, 40(4), pp.295-300, (1997).
5. Johnson J. L., German R. M., "Chemically Activated Liquid Phase Sintering of Tungsten-Copper", *The Int. J. of Powder Met.*, 30(1), pp. 91-102, (1994).
6. German R.M. , Johnson J. L., "Effect of Processing Variables on the Properties of Liquid Phase Sintered Tungsten-Copper Composites", *Adv. in Powder Met.*, 1, pp. 391-405, (1991).
7. Richardson R., "The Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives", *Wear*, 11, pp. 245-275,(1968).
8. Sahin Y., "Preparation and Some Properties of SiCp-Reinforced Aluminum Alloy Composites", *Materials and Design*, 24, pp. 671-679,(2003).
9. Yilmaz O., Buytoz S., "Abrasive Wear of Al2O3-Reinforced Aluminum-Based MMCs", *Comp. Sci. and Tech*., 61, pp. 2381-2392, (2001).
10. Wang G., Shi P., Qi M., Xu J. J., Chen F. X., Yang D. Z., "Dry Sliding Wear of a Ti50Ni25Cu25 Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composite", *Meta. and Mat. Trans. A*, 29(A), pp. 1741, (1998).
11. Tjong S. C., Lau K. C., "Properties and Abrasive Wear of TiB2/Al-4%Cu Composites Produced by Hot Isostatic Pressing", *Comp. Sci. and Tech*., 59, pp. 2005-2013,(1999).
12. Yih P., Chung D. D. L., "Titanium Diboride Copper-Matrix Composites", *J. of Mat. Sci.*, 32, pp. 1703-1709,(1997).